多模微波场中玄武岩加热及内部损伤机理研究

邵珠山[1,3],吴丹丹[1,3],袁媛[2,3],费心爽[2,3],郭轩[1,3]

(1. 西安建筑科技大学理学院,710055 西安;2. 西安建筑科技大学土木工程学院,710055 西安;3. 西安建筑科技大学陕西省岩土与地下空间工程重点试验室,710055 西安)

摘　要:随着微波加热技术的兴起,该技术被广泛应用于岩石破碎中。借助玄武岩研究了微波场中岩石内部温度场和应力场的分布规律,分析了岩石内部损伤机理。采用试验常用频率的工业微波炉对玄武岩试样进行微波照射,利用 SEM 分析微波照射前后岩石试样内部微裂纹演化规律;结合 COMSOL 5.5 建立岩石均匀模型分析微波场中岩石表面升温速率,建立岩石二相矿物模型对岩石内部温度、温度梯度和热应力分布进行分析,通过温度场和应力场评价微波加热对岩石造成的损伤。结果表明:在微波场中,同一功率水平下岩石表面升温速率先增大、后减小;SEM 图像证实了微波照射能够加速岩石内部微裂纹扩展,强吸波性矿物在经过微波照射后熔融破坏;岩石均匀模型计算得到的上表面平均升温速率与微波加热结果基本吻合,岩石二相矿物模型计算得到的内部热应力在矿物分界面处达到最大值。试验结果证明了微波照射能够加速玄武岩热损伤和裂纹扩展。

关键词:微波加热;升温速率;裂纹;损伤;数值模拟;热应力

中图分类号:TU452　　　　**文献标志码:**A

Research on heating characteristics and internal damage emergence of basalt in multimode microwave field

SHAO Zhushan[1,3], WU Dandan[1,3], YUAN Yuan[2,3], FEI Xinshuang[2,3], GUO Xuan[1,3]

(1. College of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China; 2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China; 3. Shaanxi Key Laboratory for Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China)

Abstract: With the rise of microwave heating technology, this technology is widely used in rock crushing. In this paper, basalt is used to analyze the heating characteristics, temperature and thermal stress fields, and internal damage emergence of rock under multi-source microwave irradiation. Basalt samples were irradiated by industrial microwave oven with common experimental frequency. SEM was used to analyze the evolution law of microcracks in rock samples before and after microwave irradiation. Combined with COMSOL5.5, a rock uniform model was established to analyze the heating rate of rock surface in microwave field. A rock two-phase mineral model was established to analyze the internal temperature, temperature gradient and thermal stress distribution of rock. The damage of rock caused by microwave heating was evalua-

收稿日期:2020-10-13　　　**修回日期:**2021-11-02
基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(No. 11872287);陕西省重点研发计划资助项目(No. 2019ZDLGY01-10)
通信作者:邵珠山,教授。E-mail:shaozhushan@xauat.edu.cn
引用格式:邵珠山,吴丹丹,袁媛,等. 多模微波场中玄武岩加热及内部损伤机理研究[J]. 应用力学学报,2022,39(1):129-136.
SHAO Zhushan, WU Dandan, YUAN Yuan, et al. Research on heating characteristics and internal damage emergence of basalt in multimode microwave field[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(1): 129-136.

ted by temperature field and stress field. The results show that in the microwave field, the heating rate of rock surface increases at first and then decreases at the same power level. SEM images confirm that microwave irradiation can accelerate the propagation of microcracks in rock, and strong wave-absorbing minerals are melted and destroyed after microwave irradiation. The average heating rate of the upper surface calculated by the rock homogeneous model is consistent with the results of microwave heating, and the internal thermal stress calculated by the rock two-phase mineral model reaches the maximum at the mineral interface. The experimental results show that microwave irradiation can accelerate the thermal damage and crack propagation of basalt.

Key words: microwave heating; heating rate; crack; damage; numerical simulation; thermal stress

微波加热技术被认为具有高效性、即时性、均匀性以及选择加热性。岩石的微波加热是通过将电磁能转化为热能来实现的[1-3]。在岩土工程领域，Hassani 等[4-5]采用多模腔微波装置对不同微波功率下不同种类岩石的单轴压缩强度和抗拉强度进行了研究，通过试验与数值模拟对比的方法研究了微波照射距离对硬岩表面温度的影响。Peinsitt 等[6]采用 2.45 GHz 的多模谐振腔研究了玄武岩、花岗岩和砂岩 3 种岩石的单轴压缩强度、波速和升温特性的影响。文献[7-8]为分散于花岗岩中的吸波矿物吸收了微波能量而产生热，并用“热点效应”来解释微波照射花岗岩的升温机理。文献[9-10]对玄武岩圆柱试件在微波照射后的损伤程度进行了研究，并通过有限元模型，将数值模拟与试验结果进行对比得出：微波照射引起玄武岩内部不均匀升温可增大试件内部的温度梯度，导致热损伤并形成裂纹。文献[11-12]对微波照射下的橄榄石热致裂纹扩展进行了详细研究，同时对微波照射下脆性岩石裂纹扩展临界条件及断裂进行了理论推导。卢高明等[13]分析了经过微波照射后的玄武岩表面温度、强度和波速特征，指出试样表面温度分布呈不均匀状态，升温趋势近似线性。张志强等[14]揭示了雁行分布裂纹条件下次生张拉裂纹、次生剪切裂纹的起裂、发展、贯通路径与机理。文献[15-16]指出，在相同的功率密度和处理时间下，纹理较细的矿石达到相同程度的破坏，需要输入更多的能量。微波加热技术应用于地下工程，不仅提高了掘进效率，还降低了圆盘刀具的磨损[17]。伴随着基建工程的快速发展，微波加热技术也被利用在废弃混凝土回收过程中[18-20]。

本文采用玄武岩试样分别进行微波加热和 SEM 微观形貌分析。传统微波加热的主要目的是开挖隧道破碎岩石。本文微波加热目的是研究低温对岩石的损伤。传统高功率导致岩石在经过微波加热后迅速升温，在破碎过程中产生巨大热量，也会对施工人员以及机械造成影响。本研究摒弃传统微波破岩方法，利用较低微波功率对岩石进行加热，对微波照射下岩石上表面升温速率进行分析，结合 COMSOL5.5 分析微波照射下岩石的升温速率、温度、温度梯度和应力，以及微波对某些矿物的选择性加热，造成不同矿物之间的热失配引起岩石的热损伤进行研究。

1 试验过程

1.1 试样的选择

本文采用的玄武岩取自广东湛江，XRD 标准衍射图谱如图 1 所示。图谱分析结果显示该玄武岩主要成分为：中长石(71.2%)，拉长石(15.9%)，辉石(10.5%)，以及少量橄榄石、角闪石、钛铁矿和富铝化合物。

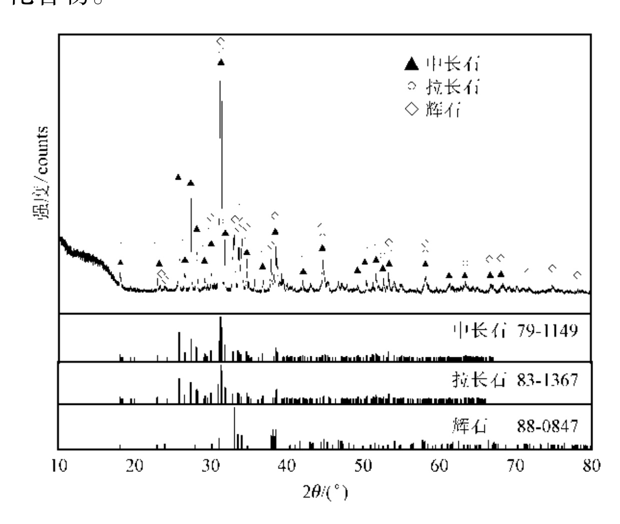


图 1　XRD 标准衍射图谱

Fig. 1　XRD standard diffraction pattern

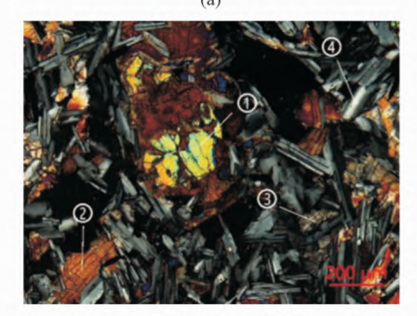
通过显微镜图像(图 2)观察玄武岩的矿物分布结构。玄武岩主要矿物由斜长石、辉石、橄榄石、角

闪石、金属矿物、碳酸岩等组成；岩石具有微晶结构、填间结构、斑状结构、块状构造等特征。



注：①-橄榄石，②-辉石，③-碳酸岩，④-斜长石微晶(50×)

(a)



注：①-橄榄石，②-角闪石，③-辉石，④-斜长石微晶(100×)

(b)

图 2　玄武岩主要矿物成分

Fig. 2　Main mineral composition of basalt

1.2　试验设备与方法

1.2.1　微波加热试验

采用课题组自主研发的连续波多模微波炉[21]，其结构主要包括微波腔体、微波发生器、控制系统、监控系统等，功率 0.2～5.6 kW。该装置主要由多源微波发生器（由 4 个 1.5 kW 的磁控管组成）、矩形传输波导和矩形谐振腔组成。该装置工作原理为[13,21]：微波发生器产生的连续波微波能量由矩形波导传输到微波谐振腔，被岩石材料吸收后，微波能转化为热能。温度测量采用安装在腔体上壁中心位置的热电偶测温，并采用手持红外测温仪辅助校正。

对玄武岩分别采用 2 种不同的功率进行微波加热。由于玄武岩在不同微波照射条件下会发生破碎、熔融，因此需要控制不同功率所对应的微波照射时间以保证照射后的试样可以进行裂纹观测及损伤研究。通过初步试验确定了在不同功率下的照射时间如表 1 所示。每组试样为 3 个，升温试验结果取三者平均值，微波加热岩石试样均为 $\Phi 25$ mm × $L25$ mm 的圆柱体。

表 1　玄武岩微波加热参数设置

Tab. 1　Setting of microwave heating parameters for basalt

岩石种类	微波功率/kW	照射时间/min
玄武岩	2	2,3,4
	3	1,1.5,2

1.2.2　SEM 微观形貌分析

选用美国 FEI 公司扫描式电子显微镜，设备型号为 Quanta200，最大有效放大倍数为 100 000 ×。对玄武岩试样进行取样，规格为边长 1 cm 的立方体。利用真空喷金设备对试样表面镀金属 Au，最后通过 SEM 进行扫描，观察细观图像。

2　试验结果分析

2.1　升温特性

如图 3 所示，随着微波照射时间增加，玄武岩上表面温度逐渐升高，升温速率先增大后减小。图中数据为岩石 3 次试验的平均值，误差线的上误差和下误差分别为 3 次试验数据的最大值和最小值。

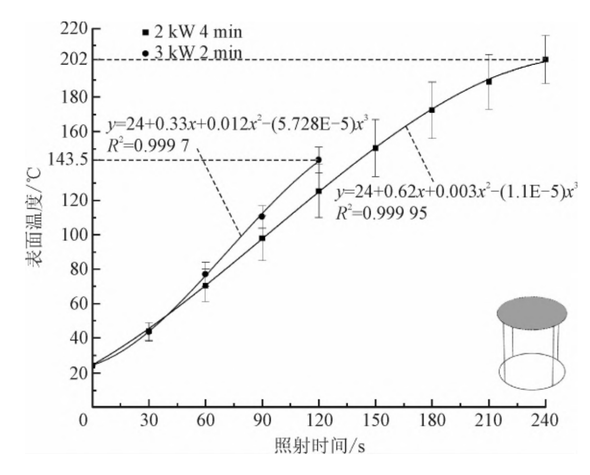


图 3　上表面平均温度与微波功率和照射时间的关系

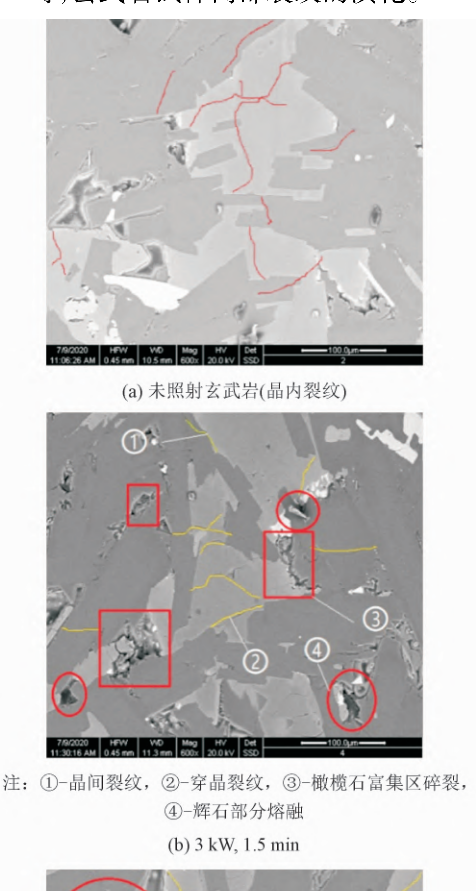
Fig. 3　Relationship between average temperature of upper surface and microwave power and exposure time

玄武岩主要成分为斜长石和辉石，辉石吸波性能较强。微波照射后，辉石吸收微波快速升温[21-22]，通过热传导将温度传递给邻近其他矿物，导致岩石温度升高。图 3 显示，在微波功率为 2 kW 时，玄武岩试样吸收微波以后，内部强吸波矿物首先升温，然后传递给相邻弱吸波矿物；岩石上表面升温拟合曲线斜率在 0～30 s 内逐渐增大，30～180 s 内斜率基本恒定，180 s 以后斜率逐渐减小。微波功率为 3 kW 时，玄武岩试样内部强吸波矿物吸收微波能量在短时间内迅速升温，上表面温度在 30 s 以后迅速增加，

微波照射 2 min 后就达到 143.5 ℃。

2.2 微观形貌分析

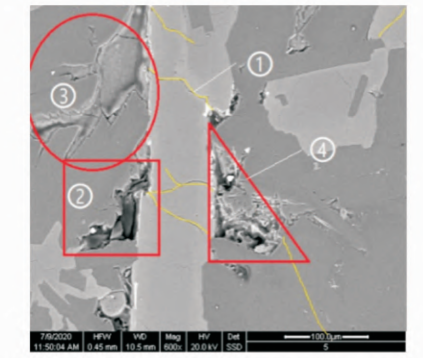
SEM 放大 600 倍观察到如下现象：该玄武岩经过微波加热以后，温度迅速升高并且产生大量微裂纹。图 4 显示了在微波功率为 3 kW、照射时间 0 ~ 2 min时，玄武岩试样内部裂纹的演化。



(a) 未照射玄武岩(晶内裂纹)

注：①-晶间裂纹，②-穿晶裂纹，③-橄榄石富集区碎裂，④-辉石部分熔融

(b) 3 kW, 1.5 min



注：①-穿晶裂纹，②-辉石熔融凹陷，③-裂纹呈放射状扩散，④-橄榄石与斜长石分界面碎裂并产生放射状裂纹

(c) 3 kW, 2 min

图 4 玄武岩在 600 倍下的扫描电镜图像

Fig. 4 Scanning electron microscope images of basalt at 600 times

由图 4 可以看出，未经过微波照射的玄武岩试样内部裂纹分布较少，大多为晶内裂纹，斜长石和辉石之间存在少量晶间裂纹。在微波功率为 3 kW、照射时间为 1.5 min 时，试样内的强吸波类矿物辉石开始熔融，产生凹陷区域，橄榄石富集区域出现碎裂，斜长石内部穿晶裂纹数量增多。照射时间为 2 min 时，辉石几乎完全熔融，并形成凹陷区域；两种斜长石矿物分界面处裂纹呈放射状向外扩散，微裂纹的数量和张开度增大，斜长石内部产生大量穿晶裂纹，橄榄石与斜长石分界面处碎裂并产生放射状裂纹。

3 数值模拟

3.1 微波照射热力耦合原理

连续体的热传导方程为[23]

$$\frac{\partial(\boldsymbol{K}_{ij}(\partial T/\partial x_j))}{\partial x_i}+P_d=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{K}_{ij}$ 为热传导率张量，W/(m·K)；P_d 为功率密度，W/m^3；x_i、x_j 为位置坐标；ρ 为密度，kg/m^3；C_p 为恒压下的热容量，J/(kg·K)；T 为温度，K。

受到微波照射的物体不断地吸收微波能量。介电材料物体可以转化微波能，特别是电场能转化为热能。为了能够量化不同材料中微波吸收的能量，得到微波功率密度为

$$P_d=2\pi f\varepsilon_0\varepsilon''E_0^2 \tag{2}$$

式中：f 为微波照射的频率，Hz；ε_0 为真空的介电常数 8.854×10^{-12} F/m；ε'' 为介电损耗因子；E_0 为微波功率产生的电场强度，V/m。

3.2 岩石模型建立

在 COMSOL5.5 中建立以 TE10 模在 WR340 波导中传播的微波场。初始温度均设置为 297.15 K，建立岩石均匀模型，取上表面平均温度研究微波照射下岩石上表面温度升温；基于岩石主要矿物成分建立二相模型(玄武岩：斜长石-辉石)，研究微波场中岩石内部的温度、温度梯度和热应力分布。二相模型的矿物尺寸根据其相对含量确定(玄武岩：长石 87.1%，辉石 10.5%)，如表 2 所示，模型如图 5 所示。玄武岩、辉石和斜长石电、物理力学参数取自相关文献[13,24-30]。

表 2 数值模型尺寸设置

Tab. 2 Numerical model size setting

种类		尺寸/mm
谐振腔		410×320×414
波导		86.36×43.18
岩石均匀模型		$\Phi25\times L25$
岩石二相模型	玄武岩斜长石	$R\in4.1\sim12.5$, $L=25$
	玄武岩辉石	$R=4.1$, $L=25$

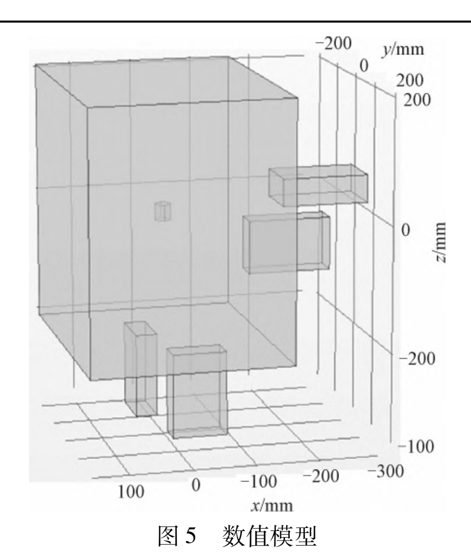


图 5　数值模型

Fig. 5　Numerical model

3.3　岩石表面温度

3.3.1　岩石上表面平均升温速率

玄武岩在不同微波功率和照射时间下的测试结果(上表面温度均值),及 COMSOL5.5 数值模拟计算结果(上表面温度均值)随照射时间的变化,如图 6 所示。数值模型中试样为均质、干燥的岩石,实际试样为非均质、含水率受环境影响的岩石。

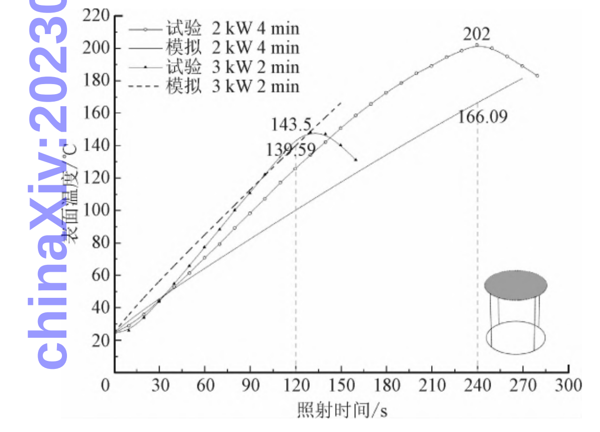


图 6　微波照射下玄武岩温度升高模拟结果验证($z=12.5$ mm)

Fig. 6　Verification of simulation results of basalt temperature rise under microwave irradiation ($z=12.5$ mm)

由图 6 中可以看出:玄武岩试样在微波功率为 2 kW时,在 0 ~ 15 s 内,试样上表面升温速率逐渐增大且低于数值模拟结果;15 s 以后速率恒定且大于数值模拟结果。微波功率为 3 kW 时,在 0 ~ 30 s 内,试样上表面升温速率逐渐增大且低于数值模拟结果;30 s 以后升温速率恒定且大于数值模拟结果。分析认为,在接受微波照射以后,岩石内部的强微波吸收类矿物首先升温,将热量传递给邻近的弱吸波矿物,随着照射时间增加,微波场中岩石内部的强吸波类矿物熔融,岩石升温速率开始逐渐减小;除此之外,岩石试样内部含有的少量水分也会影响升温速率,在接受微波照射以后水首先吸收微波升温,岩石试样内的水分蒸发,微波利用率逐渐升高[31],岩石迅速升温。从试验测得的升温曲线来看,升温速率先增大、后减小。已有的试验结果表明升温速率变化与含水量密切相关,岩石升温与矿物组成发生变化也有一定的关联。

3.3.2　岩石上表面温度分布

由于岩样受热不均匀,因此有必要对岩样内部温度分布进行研究。受试验仪器限制,只能测得试样上表面温度。为了研究微波功率和照射时间对空间温度分布的影响,结合 COMSOL5.5 计算结果分析玄武岩试样上表面温度分布情况。如图 7 所示:试样上表面温度在纵向上大致对称分布,中心温度高两边温度低。

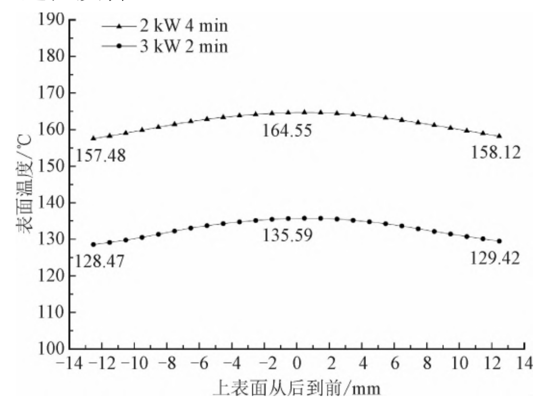


图 7　模拟玄武岩上表面温度分布($z=12.5$ mm)

Fig. 7　Simulation of temperature distribution on the upper surface of basalt($z=12.5$ mm)

3.4　岩石内部热应力

对岩石二相矿物模型进行多物理场耦合数值模拟,得到了岩石内部的温度场、温度梯度及热应力场分布规律,结果如图 8 ~ 图 10 所示。利用 COMSOL5.5 对两种岩石的主要成岩矿物进行热应力分析,计算结果如图 8 所示。

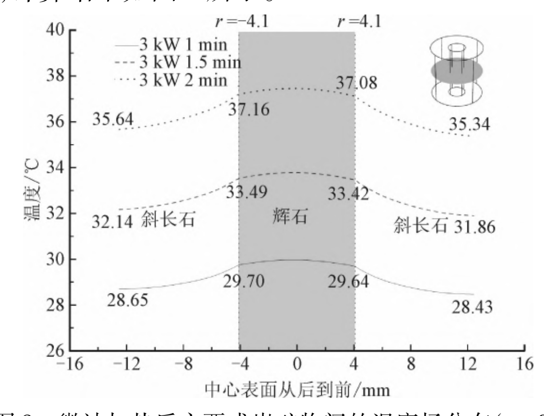


图 8　微波加热后主要成岩矿物间的温度场分布($z=0$)

Fig. 8　Temperature field distribution among main diagenetic minerals after microwave heating($z=0$)

由图 8 可知,微波照射时间越长,岩石二相模型的中心表面温度越高,岩石内部温度从中心至外边缘逐渐降低。对于斜长石-辉石二相模型,辉石区域温度最高且明显高于斜长石区域,温度由辉石区域至斜长石区域逐渐降低,在斜长石外边缘处达到最低。

由图 9 可知,斜长石内部温度梯度随照射时间增加而变大,辉石则相反。辉石由于吸波性能较强,吸收微波以后整体升温,内部温度梯度最低;斜长石和辉石的吸波性能差异较大,与辉石相比较,斜长石在短时间内加热升温幅度较小,因此斜长石与辉石分界面处($r = \pm 4.1$ mm)温度梯度最大。

由图 10 可知,矿物内部热应力随照射时间增加而变大,热应力最大值出现在斜长石与辉石分界面处($r = \pm 4.1$ mm),热膨胀系数较大的辉石受到斜长石约束,辉石和斜长石内部径向应力 σ_r 为压应力(负值);由于两种矿物热膨胀性质的差异性,在矿物分界面处切向应力 σ_θ 达到最大值。图中正负号表示切向应力的方向,切向应力的数值沿环向大致对称,此处也是最先剪切破坏的位置。

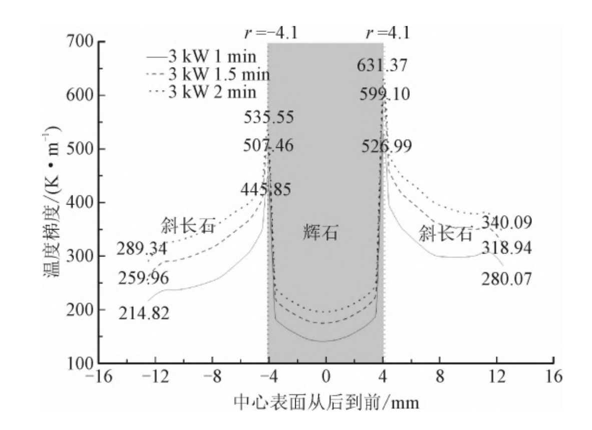
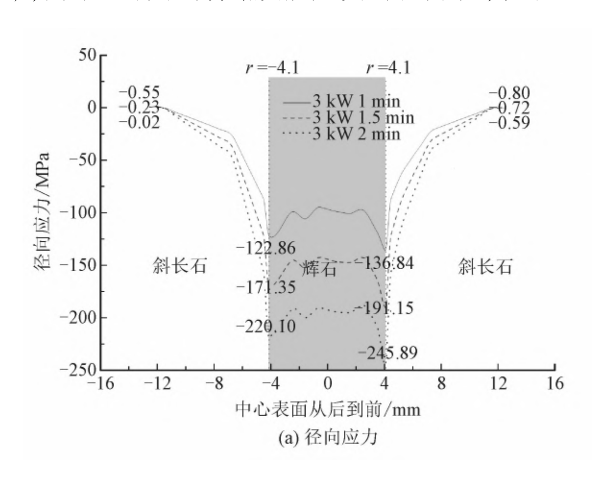


图 9 微波加热后主要成岩矿物间的温度梯度分布($z = 0$)

Fig. 9 Temperature gradient distribution among main diagenetic minerals after microwave heating($z = 0$)



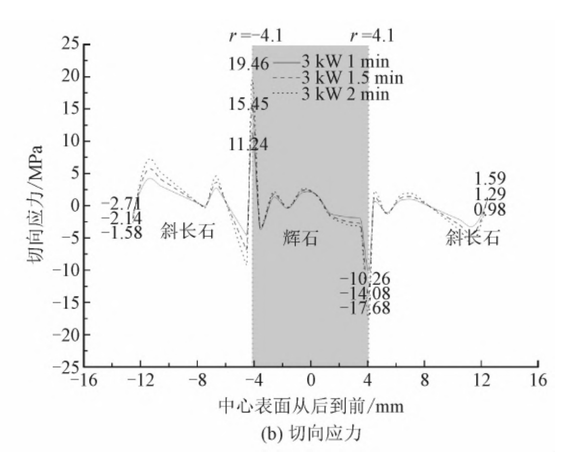


图 10 微波加热后主要成岩矿物间的应力分布($z = 0$)

Fig. 10 Stress distribution among main diagenetic minerals after microwave heating($z = 0$)

4 结 论

本文基于多物理场耦合方法,利用试验和数值模拟,研究了微波照射下玄武岩内部温度场与应力场的分布规律,得到以下结论。

1)微波加热的 SEM 微观形貌分析显示,玄武岩试样内部裂纹数量随照射时间增加逐渐增多,形成的裂纹主要有晶间裂纹与穿晶裂纹,穿晶裂纹占主导地位,强吸波类矿物辉石逐渐熔融并形成明显凹陷区域,橄榄石富集区碎裂。

2)玄武岩上表面升温速率受岩石内部矿物分布和含水率影响较大。微波功率为 2 kW 时,照射 15 s 以后升温速率迅速增大;微波功率增大到 3 kW 时,照射 30 s 以后升温速率增大;上表面温度在纵向上大致对称分布,中心温度高两侧温度低。

3)成岩矿物经过微波照射后,辉石区域温度整体高于斜长石,不同矿物接触面处温度梯度与热应力最大,辉石与斜长石分界面处出现最大温度梯度,导致不同矿物分界面处成为薄弱区;矿物内部为受压破坏,界面处径向应力和切向应力达到最大值,因而不同矿物分界面处是最先受剪破坏的位置。

参考文献

[1] HARTLIEB P, GRAFE B, SHEPEL T, et al. Experimental study on artificially induced crack patterns and their consequences on

mechanical excavation processes[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2017,100:160-169.

[2] TOIFL M,MEISELS R,HARTLIEB P,et al. 3D numerical study on microwave induced stresses in inhomogeneous hard rocks[J]. Minerals engineering,2016,90:29-42.

[3] TOIFL M,HARTLIEB P,MEISELS R,et al. Numerical study of the influence of irradiation parameters on the microwave-induced stresses in granite[J]. Minerals engineering,2017,103/104:78-92.

[4] HASSANI F,NEKOOVAGHT P,GHARIB N. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave-assisted underground excavation[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering,2016,8(1):1-15.

[5] HASSANI F,NEKOOVAGHT P,RADZISZEWSKI P,et al. Microwave assisted mechanical rock breaking[C]//Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. Singapore: Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering,2011:784-785.

[6] PEINSITT T,KUCHAR F. Microwave heating of dry and water saturated basalt,granite and sandstone[J]. International journal of mining and mineral engineering,2010,2(1):18-29.

[7] KINGMAN S,VORSTER W,ROWSON N. The influence of mineralogy on microwave assisted grinding[J]. Minerals engineering,2000,13(3):313-327.

[8] WHITTLES D N,KINGMAN S W,REDDISH D J. Application of numerical modeling for prediction of the influence of power density on microwave-assisted breakage[J]. International journal of mineral processing,2003,68(1):71-91.

[9] MIAO Duo,ZHAO Song,ZHU Kecheng,et al. Activation of persulfate and removal of ethyl-parathion from soil: Effect of microwave irradiation.[J]. Chemosphere,2020,253:1-8.

[10] HARTLIEB P,LEINDL M,KUCHAR F,et al. Damage of basalt induced by microwave irradiation[J]. Minerals engineering,2012,31:82-89.

[11] YUAN Yuan,SHAO Zhushan,QIAO Rujia,et al. Thermal response and crack propagation of mineral components in olivine basalt under microwave irradiation[J]. Arabian journal of geosciences,2020,13(14):1-11.

[12] 袁媛,邵珠山. 微波照射下脆性岩石裂纹扩展临界条件及断裂过程研究[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2112-2119. (YUAN Yuan,SHAO Zhushan. Study on the critical condition and fracture process of brittle rock under microwave irradiation[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(5):2112-2119(in Chinese)).

[13] 张志强,陈方方,李宁,等. 裂纹雁行分布岩体试样应力场特征与破坏模式研究[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2280-2287. (ZHANG Zhiqiang,CHEN Fangfang,LI Ning,et al. Study on stress field characteristics and failure modes of rock samples with crack echelon distribution[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(5):2280-2287(in Chinese)).

[14] 卢高明,冯夏庭,李元辉,等. 多模谐振腔对赤峰玄武岩微波致裂效果研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(6):1115-1124. (LU Gaoming,FENG Xiating,LI Yuanhui et al. Research on the microwave cracking effect of multi-mode resonant cavity on Chifeng basalt[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2020,42(6):1115-1124(in Chinese)).

[15] BRADSHAW S,ALI A,MARCHAND,et al. Performance quantification of applicators for microwave treatment of crushed mineral ore[J]. Journal of microwave power and electromagnetic energy,2011,45(1):30-35.

[16] ALI A,BRADSHAW S. Quantifying damage around grain boundaries in microwave treated ores[J]. Chemical engineering and processing:process intensification,2009,48(11):1566-1573.

[17] WEI Wei,SHAO Zhushan,ZHANG Yuanyuan,et al. Fundamentals and applications of microwave energy in rock and concrete processing—A review[J]. Applied thermal engineering,2019,157:1-16.

[18] 肖建庄,吴磊,范玉辉. 微波加热再生粗骨料改性试验[J]. 混凝土,2012(7):55-57. (XIAO Jianzhuang,WU Lei,FAN Yuhui. Experiment on modification of recycled coarse aggregate by microwave heating[J]. Concrete,2012 (7): 55-57(in Chinese)).

[19] 姚尧,刘红梅,王建军,等. 再生混凝土改性研究现状[J]. 材料科学与工程学报,2019,37(2):339-344. (YAO Yao,LIU Hongmei,WANG Jianjun,et al. Research status of modification of recycled concrete[J]. Journal of materials science and engineering,2019,37 (2): 339-344(in Chinese)).

[20] 陈新年,戴俊,孟振. 微波辅助机械剔选再生混凝土骨料技术[J]. 西安科技大学学报,2013,33(5):604-608. (CHEN Xinnian,DAI Jun,MENG Zhen. Microwave-assisted mechanical selection of recycled concrete aggregate technology[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2013,33(5):604-608 (in Chinese)).

[21] 李元辉,卢高明,冯夏庭,等. 微波加热路径对硬岩破碎效果影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(6):1460-1468. (LI Yuanhui,LU Gaoming,FENG Xiating,et al. Experimental study on the influence of microwave heating path on hard rock fragmentation[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2017,36(6):1460-1468(in Chinese)).

[22] LU Gaoming,LI Yuanhui,HASSANI F,et al. The influence of microwave irradiation on thermal properties of main rock-forming minerals[J]. Applied thermal engineering,2017,112:1523-1532.

[23] TANG Y,XU G,QU C,et al. Damage simulation of a random aggregate model induced by microwave under different discontinuous ratios and exposure times[J]. Advances in materials science and engineering,2016:1-11.

[24] 戴俊,李栋烁. 微波照射下玄武岩强度参数尺寸效应分析[J]. 煤炭技术,2018,37(9):8-10. (DAI Jun,LI Dongshuo. Analysis of size effect of basalt strength parameters under microwave irradiation

[J]. Coal technology,2018,37(9):8-10(in Chinese)).

[25] MEISELS R,TOIFL M. Microwave propagation and absorption and its thermo-mechanical consequences in heterogeneous rocks[J]. International journal of mineral processing,2015,135:40-51.

[26] NELSON S O,LINDROTH D P,BLAKE R L. Dielectric properties of selected and purified minerals at 1 to 22 GHz[J]. Geophysics, 1989,54(10):1344-1349.

[27] 肖衡林,吴雪洁,周锦华. 岩土材料导热系数计算研究[J]. 路基工程,2007(3):54-56.(XIAO Henglin,WU Xuejie,ZHOU Jinhua. Study on calculation of thermal conductivity of geotechnical materials[J]. Subgrade engineering, 2007 (3): 54-56 (in Chinese)).

[28] 郭颖星,张东宁,祝爱玉,等. 斜长石、辉石混合模型的电导率有限元数值计算研究[J]. 地球物理学报,2018,61(9):3722-3734.(GUO Yingxing,ZHANG Dongning,ZHU Aiyu,et al. Finite element numerical calculation of electrical conductivity of plagioclase and pyroxene mixed model[J]. Journal of geophysics,2018. 61(9):3722-3734(in Chinese)).

[29] 肖金凯,赖兆生,冯俊明. 岩石和土壤的微波介电特征及其在微波遥感中的应用研究[J]. 科学通报,1983(17):1055-1057.(XIAO Jinkai, LAI Zhaosheng, FENG Junming. Study on microwave dielectric characteristics of rock and soil and its application in microwave remote sensing[J]. Science bulletin,1983(17):1055-1057(in Chinese)).

[30] 钱旺生. 高温高压下斜方辉石及其高压相的热力学和弹性性质[D]. 合肥:中国科学技术大学,2019.

[31] 胡亮. 岩石含水率对微波穿透深度的影响[J]. 大庆石油地质与开发,2019,38(4):70-75.(HU Liang. Effect of rock moisture content on microwave penetration depth[J]. Petroleum geology and development of Daqing,2019,38(4): 70-75(in Chinese)).

(编辑 黄崇亚)